

PIANO TRIENNALE DI REALIZZAZIONE 2022-2024 - RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE

Progetti di ricerca di cui all'art. 10 comma 2, lettera a) del decreto 26 gennaio 2000

AFFIDATARIO: Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile [ENEA]

Tema - Titolo del progetto: 1.9 "Solare termodinamico"

Durata: 36 mesi

Semestre n. 5 – Periodo attività: 01/01/2024 – 30/06/2024

ABSTRACT ATTIVITA' SEMESTRALE:

Il Progetto 1.9 "Solare termodinamico", che prevede 1 work package (WP1), è organizzato in 3 tematiche scientifico-applicative, ognuna delle quali comprende diverse linee di ricerca che si sviluppano in linee di attività (LA) in carico all'affidatario ENEA o alle Università co-beneficiarie; per la comunicazione e disseminazione dei risultati sono previste 2 ulteriori LA.

Nel 1° semestre 2024 risultavano in fase di esecuzione 17 LA, in carico sia a ENEA che alle 6 Università co-beneficiarie. Nella fattispecie, nel 1° semestre 2024 sono proseguite 14 LA (LA1.2, LA1.3, LA1.4, LA1.5, LA1.10, LA1.11, LA1.14, LA1.17, LA1.18, LA1.19, LA1.20, LA1.23, LA1.24, LA1.26) e iniziate 3 LA (LA1.6, LA1.9, LA1.13). Delle 17 LA in esecuzione, sono state portate a termine 2 LA (LA1.4, LA1.11) che avevano subito ritardi nei precedenti 1° e 2° semestre 2023.

Le 17 LA in esecuzione hanno interessato tutte le 3 tematiche scientifico-applicative, nonché l'attività di comunicazione e disseminazione.

In particolare, con riferimento alla tematica "materiali e componenti avanzati per impianti CSP", le attività svolte hanno riguardato le linee di ricerca (i) sui coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari (LA1.2, in carico a ENEA, e LA1.3, in carico all'Università di Palermo), (ii) sulla tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di energia in contesti civili e industriali (LA1.4 e LA1.6, in carico all'Università degli Studi di Firenze, e LA1.5, in carico a ENEA), (iii) sulle superfici riflettenti autopulenti con sensoristica integrata per impianti CSP (LA1.9, in carico a ENEA) e (iv) sui sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti per applicazioni distribuite a media temperatura del CSP (LA1.10, in carico a ENEA).

Inoltre, con riferimento alla tematica "ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili", le attività svolte hanno riguardato le linee di ricerca (i) sui sistemi di accumulo termico, di tipo termoclino, ibridizzati alimentabili da CSP e da altre tecnologie energetiche rinnovabili, per la produzione di calore per processi industriali (LA1.11 e LA1.13, in carico a ENEA, e LA1.14, in carico al Politecnico di Torino), (ii) sui sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi per l'ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili (LA1.17, in carico a ENEA, e LA1.18, in carico al Politecnico di Torino) e (iii) sulla simulazione e ottimizzazione di impianti ibridi CSP/PV/Eolici di scala medio-piccola operanti sui mercati MGP e MSD (LA1.19, in carico al Politecnico di Milano).

In aggiunta, con riferimento alla tematica “soluzioni tecniche e procedure operative per il settore industriale del CSP”, le attività svolte hanno riguardato le linee di ricerca (i) sulle tecnologie ad ultrasuoni per sistemi di rilevazione di occlusioni solide all’interno del piping di impianti CSP utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore (LA1.20, in carico all’Università degli Studi di Napoli Federico II) e (ii) sulle procedure operative per impianti CSP con fluido termovettore costituito da miscele di sali fusi bassofondenti e studio della compatibilità dei materiali a contatto con le miscele in condizioni reali di funzionamento (LA1.23, in carico a ENEA, e LA1.24, in carico all’Università degli Studi di Roma Tor Vergata).

Infine, anche l’attività di comunicazione e disseminazione è stata regolarmente svolta (LA1.26, in carico a ENEA).

In generale, nel corso del 1° semestre 2024, non sono state riscontrate significative criticità nello svolgimento delle LA in esecuzione e che proseguiranno nel successivo semestre; per queste LA sussistono le condizioni perché i risultati attesi, come da capitolato di Progetto, siano ottenuti. Per quanto attiene alle LA concluse, queste hanno ottenuto i risultati attesi. In particolare, in merito al ritardato completamento della LA1.11, ultimata a gennaio 2024, e al conseguente ritardo nell’inizio della LA1.13, avvenuto a febbraio 2024, con riferimento alla specifica linea di ricerca cui questa LA afferisce (“sistemi di accumulo termico, di tipo termoclino, ibridizzati, ...”) non si prevedono ripercussioni né in termini di ottenimento degli obiettivi specifici e dei risultati attesi, né di sviluppo dei prodotti previsti. Inoltre, in merito al ritardato completamento della LA1.4, avvenuto a marzo 2024, questo non avrà ripercussioni sulle LA1.5 e LA1.6 (in corso di regolare esecuzione) e, più in generale, sull’ottenimento degli obiettivi specifici e dei risultati attesi della linea di ricerca di riferimento (“tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC, ...”). Inoltre, ci sono tutte le condizioni perché i ritardi nell’ultimazione delle LA1.11 e LA1.4 non comportino scostamenti tecnico-economici di rilievo e né influenzino il conseguimento degli obiettivi generali del Progetto nel suo complesso. Infine, le possibili ricadute sul sistema energetico e produttivo delle attività di ricerca svolte saranno indicate al termine del prossimo semestre del triennio di Progetto, quando le diverse linee di ricerca saranno concluse e saranno disponibili i risultati/prodotti finali della ricerca.

ATTIVITA' SVOLTE	
AFFIDATARIO / COBENEFICIARIO	SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO
ENEA	Facendo riferimento alla struttura del Progetto 1.9 “Solare termodinamico”, sono di seguito descritte le attività svolte nel 1° semestre 2024 da ENEA. Tematica scientifico-applicativa “materiali e componenti avanzati per impianti CSP”. - Nell’ambito della linea di ricerca sui “coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari”, nel 1° semestre 2024 è proseguita la LA1.2 avente per oggetto la “realizzazione di coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti micro-PTC a media temperatura e di coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP ad alta temperatura”. In particolare, nel corso del 1° semestre 2024, è stato raggiunto il primo dei due principali obiettivi della LA1.2 che consisteva nel realizzare coating innovativi a elevate prestazioni fototermiche e ad alta stabilità per tubi ricevitori solari evacuati di impianti micro-CSP di tipo micro-PTC operanti a media temperatura ($\leq 350\text{ }^{\circ}\text{C}$). I coating sono stati realizzati impiegando gli stessi materiali adoperati nel precedente semestre di Progetto, ovvero materiali metallici

(W, Ag), CERMET a doppio nitrato (WN-AIN) e materiali ceramici (AIN, SiO₂). Si evidenzia che se da una parte la tecnologia ENEA del CERMET a doppio nitrato è nota per qualità, robustezza ed efficienza produttiva del processo di fabbricazione dei coating, la stabilità termica dei coating ha richiesto un'attenta verifica; pertanto, un coating dalle prestazioni fototermiche non ottimizzate è stato realizzato e sottoposto a test accelerati di invecchiamento condotti a 620 e 650 °C che hanno evidenziato un degrado praticamente nullo delle prestazioni fototermiche dopo una vita utile di 25 anni a 350 °C. Sono stati messi a punto processi di sputtering d'interesse industriale (semplici, robusti, a basso costo e con alta velocità di deposizione) per la fabbricazione dell'intero coating solare su substrato tubolare. È stata riconsiderata e affinata la progettazione ottica già effettuata nel precedente semestre al fine di pervenire al progetto ottico di quattro coating per applicazioni a 200, 250, 300 e 350 °C dalle prestazioni fototermiche ulteriormente migliorate in termini di minore emissività termica. I quattro coating progettati presentavano un'assorbanza solare (α_s) maggiore del 96% e un'emissività termica (ϵ_h) del 4.89% a 200 °C, 5.40% a 250 °C, 6.01% a 300 °C e 6.64% a 350 °C. Il progetto ottico con parametri fototermici ottimizzati per i 350 °C è stato realizzato e il coating risultante aveva α_s uguale a 96.13% e ϵ_h a 350 °C pari a 7.12%. È stato quindi realizzato un prototipo di coating per il tubo ricevitore evacuato dell'impianto micro-CSP di tipo micro-PTC dell'Università degli Studi di Firenze per applicazioni fino a 350 °C; il prototipo di coating, che costituiva uno dei prodotti attesi della LA1.2, è stato depositato su un tubo d'acciaio di diametro esterno 10 mm, spessore di parete 1 mm e lunghezza di 500 mm. Sempre con riferimento alla LA1.2, nel corso nel 1° semestre 2024 è proseguita l'attività di realizzazione di film di silice (SiO₂) prodotti per sol-gel e depositati mediante lo spin coater di tipo modulare acquisito nella precedente LA1.1, in grado di operare in atmosfera inerte (con possibilità di assicurare una buona ripetibilità dei processi) e velocità di rotazione programmabile (potendo realizzare film con spessori compresi in un ampio range, pertanto modulabili a seconda delle caratteristiche richieste). Le ricette per l'ottenimento dei materiali ceramici a base di SiO₂, sviluppate nel corso della LA1.1, sono state impiegate per realizzare film di SiO₂ con l'ausilio di questa nuova strumentazione, verificando che le proprietà morfologiche e strutturali ottenute fossero idonee per l'impegno degli stessi come strati antiriflesso di un coating solare.

- Nell'ambito della linea di ricerca sulla "tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di energia in contesti civili e industriali", nel 1° semestre 2024 è proseguita la LA1.5 avente per oggetto la "caratterizzazione sperimentale di un prototipo di sistema micro-PTC innovativo sviluppato da UniFI".

Nella LA1.5, nel corso del 1° semestre 2024, ENEA, con il supporto dell'Università degli Studi di Firenze (UniFI), ha completato l'attività di predisposizione delle facility sperimentali per testare il prototipo di sistema micro-PTC proposto da UniFI che, nel mese di giugno 2024, è stato consegnato e installato presso la "stazione testing componenti solari a media e bassa temperatura" dell'impianto sperimentale "ENEA-SHIP" del C.R. ENEA di Casaccia. Tale stazione testing di "ENEA-SHIP" prevedeva l'impiego di olio diatermico come fluido termovettore e un riscaldatore elettrico da 100 kW dotato di buffer di accumulo. Nell'ambito della LA1.5, sono stati realizzati diversi interventi di adeguamento delle dotazioni di "ENEA-SHIP", quali il potenziamento del sistema di acquisizione dati, la riconfigurazione del sistema DCS (Distributed Control System) e la revisione del circuito idraulico. Per consentire test a temperature maggiori di 200 °C, tutte le connessioni esterne dei 4 collettori parabolici del modulo micro-PTC sono state sigillate con silicone ad alta temperatura. Il micro-PTC è stato equipaggiato con numerosi sensori di precisione, connessi ai sistemi di acquisizione dati e DCS di "ENEA-SHIP", per monitorare le variabili critiche; i dati, raccolti con campionamento ogni 2.5 secondi, venivano elaborati con un software sviluppato in LabView. Infine, sono state realizzate una piazzola dotata di servizi elettrici e una piattaforma rotante, per inseguimento azimutale, su cui è stato alloggiato il micro-PTC.

- Nell'ambito della linea di ricerca sulle "superfici riflettenti autopulenti con sensoristica integrata per impianti CSP", nel 1° semestre 2024 è iniziata la LA1.9 avente per oggetto la "fabbricazione, attraverso tecniche economiche e scalabili, di sensori piezoelettrici e/o resistivi e loro integrazione negli specchi autopulenti".

A partire dal lavoro svolto nel corso della precedente LA1.8 su nanocompositi a base nitrurica e polimeri trasparenti resistivi sviluppati come rivestimenti autopulenti di specchi solari di impianti CSP, nella LA1.9, nel corso del 1° semestre 2024, sono state esplorate le potenzialità derivanti dell'aggiunta di ulteriori requisiti sensoristici ai suddetti rivestimenti per adibire gli ultimi strati degli specchi solari all'autodiagnosi del loro livello di sporcamento, o più in generale della failure dello specchio, e poter razionalizzare le operazioni di ordinaria manutenzione nella direzione della "smartizzazione" del campo solare. Sono state studiate le proprietà piezoelettriche dei suddetti materiali, che possono essere collegate all'accumulo di polvere e allo sporcamento superficiale, nonché il loro comportamento elettricamente resistivo, che può aiutare a monitorare potenziali guasti. Con la finalità di fabbricare sensori piezoelettrici e/o resistivi integrabili nei rivestimenti autopulenti è stato condotto uno studio sistematico sulle condizioni dei processi di fabbricazione dei materiali, sullo spessore dei film depositati e su alcuni processi di post-trattamento, idonei a massimizzare le proprietà elettriche desiderate. Con riferimento a rivestimenti di tipo piezoelettrico, essendo noto che il nitruro di alluminio, opportunamente orientato, ha proprietà piezoelettriche, obiettivo dell'attività di ricerca svolta è stato la fabbricazione, per sputtering, di film sottili con coefficienti piezoelettrici idonei alla realizzazione di sensori di sporcamento. È stato misurato il coefficiente piezoelettrico d_{33} dei campioni fabbricati, che risulta sempre superiore a 1 pC/N. In particolare, è stato realizzato un prototipo di sensore piezoelettrico su scala laboratoriale (geometria quadrata di dimensioni 5x5 cm e circolare di diametro 5 cm), a base di nitruro di alluminio, con d_{33} pari a 1.8 pC/N, integrabile in specchi solari autopulenti. Un'altra proprietà utile per rilevare i guasti degli specchi solari in diverse configurazioni è un cambiamento nella resistività/conducibilità elettrica del rivestimento. L'idea chiave, su cui è iniziata nel presente semestre la sperimentazione su nanocompositi polimerici resistivi a base di polisilsesquiossani realizzati con tecniche di processing dei polimeri (spray o stampa), è quella di creare una sorta di "pelle" dello specchio solare autopulente, sensibile e multifunzionale, in grado di fornire più output, in modo simile ai materiali intelligenti utilizzati nel settore edile.

- Nell'ambito della linea di ricerca sui "sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti per applicazioni distribuite a media temperatura del CSP", nel 1° semestre 2024 è proseguita la LA1.10 avente per oggetto l'"analisi, implementazione delle facility di test e sperimentazione in campo di sistemi di accumulo termo-chimico a zeoliti per applicazioni distribuite a media temperatura".

Nella LA1.10, nel corso del 1° semestre 2024, è stata portata a termine la progettazione di dettaglio delle modifiche da apportare alle facility di test dei sistemi di accumulo a zeoliti del C.R. ENEA di Trisaia, costituite principalmente dall'impianto "Sunstore" e dall'impianto di test ad olio diatermico, per ottenere un nuovo assetto operativo con range di temperatura tra 150 e 250 °C. In particolare, la progettazione ha riguardato: nuovo sistema di condensazione-evaporazione sottovuoto, comprensivo del sistema di accumulo e raccolta del condensato; adeguamento del circuito sottovuoto con l'aggiunta di elettrovalvole per l'automazione dei processi di carica e scarica; adeguamento del circuito termo-idraulico ad acqua, a servizio sia del condensatore che dell'evaporatore; interfacciamento del circuito termovettore (HTF) a olio diatermico con l'impianto "Sunstore"; adeguamento del sistema di acquisizione e controllo alle nuove condizioni di prova. Contestualmente alla progettazione, è stata completata la specifica tecnica per la fornitura ed installazione delle apparecchiature (termo-idrauliche, elettriche, ecc.) e degli strumenti di misura necessari all'upgrade dell'impianto "Sunstore" per adeguarlo alle nuove condizioni operative. È stato, quindi, affidato il relativo appalto avente per oggetto la «fornitura e installazione di apparecchiature e strumenti per l'up-grade dell'impianto "Sunstore"» che prevedeva, tra l'altro, la fornitura e installazione delle seguenti macro-unità: sistema di evaporazione/condensazione comprensivo di accumulo e relativi apparati di riscaldamento e raffreddamento, accessori termo-idraulici per circuito vuoto e circuito olio diatermico, quadro elettrico per adeguamento sistema di acquisizione e controllo. Infine, sono state portate a termine le attività di sviluppo, in ambiente Matlab, di un modello numerico dinamico a parametri concentrati per la simulazione del comportamento del reattore a zeoliti nelle diverse condizioni operative.

	Tematica scientifico-applicativa “ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili”. - Nell’ambito della linea di ricerca sui “sistemi di accumulo termico, di tipo termoclino, ibridizzati alimentabili da CSP e da altre tecnologie energetiche rinnovabili, per la produzione di calore per processi industriali”, nel 1° semestre 2024: (1) è proseguita ed è stata portata a termine, nel mese di gennaio 2024, la LA1.11 avente per oggetto l’“analisi e progettazione preliminare di un prototipo di sistema di accumulo termoclino ibridizzato alimentabile da CSP e altre tecnologie FER, asservito all’impianto ENEA-SHIP, per la produzione di calore per processi industriali”; (2) è iniziata, nel mese di febbraio 2024, la LA1.13 (conseguenziale alla LA1.11) avente per oggetto la “realizzazione e sperimentazione di un prototipo di sistema di accumulo termoclino ibridizzato alimentabile da CSP e altre tecnologie FER, asservito all’impianto ENEA-SHIP, per la produzione di calore per processi industriali”. Nella LA1.11, nel corso del mese di gennaio 2024, si è proceduto alla stipula del Contratto di Appalto avente per oggetto “lavori per la realizzazione della sezione di prova PTR Ibrido”. Sulla base del progetto preliminare completato nella LA1.11 nel corso del 1° semestre 2023, l’Appalto prevedeva la realizzazione e fornitura del prototipo di sistema di accumulo termoclino ibridizzato e la sua implementazione nell’impianto sperimentale Fresnel “ENEA-SHIP” opportunamente modificato. Il progetto prevedeva che il prototipo fosse costituito da un serbatoio cilindrico verticale ($D = 1.3 \text{ m}$, $h = 2.5 \text{ m}$), contenente il mezzo di accumulo che è una miscela ternaria di sali ($\approx 5 \text{ t}$ di Hitec-XL), e dotato di 3 scambiatori elicoidali a fascio tubiero (2 di carica, di cui 1 alimentato da CSP e 1 dalla caldaia elettrica collegata a PV, e 1 di scarica), immersi nei sali fusi e al cui interno circola olio diatermico (Therminol-66); erano previste 2 giranti assiali posizionate nei canali degli scambiatori, da adoperarsi per regolare la portata dei sali / ottimizzare lo scambio termico. A seguito della predisposizione del pagamento dell’anticipo contrattuale ed essendo stata avviata l’esecuzione del Contratto, è stato possibile ritenere conclusa la LA1.11. Nella LA1.13, nel corso del 1° semestre 2024, la società appaltatrice del suddetto Contratto ha lavorato alla realizzazione del prototipo di sistema di accumulo termoclino a sali fusi ibridizzato tra CSP e altre tecnologie FER, che era stato progettato nella LA1.11, e dello skid per l’assemblaggio dei componenti e del serbatoio di accumulo. Durante la fase realizzativa il personale ENEA ha eseguito alcuni sopralluoghi presso le officine della società appaltatrice per verificare la corretta realizzazione dei 3 scambiatori di calore, componenti principali di tutto il sistema. - Nell’ambito della linea di ricerca sui “sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi per l’ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili”, nel 1° semestre 2024 è proseguita la LA1.17 avente per oggetto la “realizzazione e sperimentazione di un dispositivo su scala di laboratorio per il riscaldamento elettrico dei sali fusi”. Nella LA1.17, nel corso del 1° semestre 2024, è stata portata a termine la realizzazione del dispositivo sperimentale su scala di laboratorio, progettato nella precedente LA1.15, per il “proof of concept” del riscaldamento elettrico dei sali fusi con le microonde. Il dispositivo sperimentale, installato presso il C.R. ENEA di Casaccia, è principalmente costituito da: un serbatoio cilindrico dei sali fusi con diametro di 28 cm, altezza di 50 cm e volume di controllo dei sali fusi di circa 6 litri che contiene circa 12 kg di “Solar Salt” (miscela binaria di sali con 40% KNO_3 + 60% NaNO_3); un generatore elettrico di microonde di tipo commerciale, con potenza regolabile fino a 3 kW e frequenza di $2450 \text{ MHz} \pm 25 \text{ MHz}$; una guida d’onda, realizzata su progetto, che collega il generatore di microonde al volume di controllo dei sali; un Vector Network Analyzer (VNA), che è una strumentazione di misura per l’analisi della risposta di dispositivi elettrici a frequenze radio e microonde, utilizzabile (sostituendo il generatore) per caratterizzare il comportamento elettromagnetico del serbatoio come cavità risonante; uno Sliding Short Circuit (SSC), che è una strumentazione per la regolazione del coefficiente di riflessione elettromagnetico nella cavità risonante; una girante assiale necessaria per uniformare la temperatura dei sali fusi; un sistema di resistenze elettriche integrate nel serbatoio, per la fusione dei sali (i sali solidi sono trasparenti alle microonde) e il loro riscaldamento. Sono stati infine eseguiti test preliminari sul dispositivo sperimentale
--	--

	per la verifica della funzionalità dei suoi sottosistemi di impianto (circuito di raffreddamento/circuito elettrico ed elettronico/sistema di acquisizione dati e controllo). Tematica scientifico-applicativa “soluzioni tecniche e procedure operative per il settore industriale del CSP”. - Nell’ambito della linea di ricerca sulle “procedure operative per impianti CSP con fluido termovettore costituito da miscele di sali fusi bassofondenti e studio della compatibilità dei materiali a contatto con le miscele in condizioni reali di funzionamento”, nel 1° semestre 2024 è proseguita la LA1.23 avente per oggetto le “prove di circolazione delle miscele di sali fusi bassofondenti per applicazioni a media e ad alta temperatura, messa a punto di procedure operative per la gestione delle miscele e prove di compatibilità dei materiali”. Nella LA1.23, nel corso del 1° semestre 2024, sono state portate a termine sul circuito “MoSE” (Molten Salt Experiments) del C.R. ENEA di Casaccia le prove di compatibilità dei materiali (iniziate nel precedente semestre), sia con ciclaggio termico che in condizioni isoterme, per valutare l’effetto della corrosione su provini di acciaio al CASTM A516 Gr.70 (P355NH), saldati e non saldati, posti a contatto con la miscela di sali bassofondente quaternaria Na/K/Ca/Li//NO₃ selezionata per applicazioni a media temperatura (200-400 °C). E’ stato fermato e riavviato il circuito con conseguente congelamento e scongelamento della miscela di sali al fine di estrarre i provini di acciaio al C sottoposti ai test di corrosione in tre differenti momenti, così da analizzare l’evolversi del fenomeno corrosivo nel tempo. E’ stato studiato, attraverso le grandezze acquisite, il comportamento del circuito durante il cambiamento di fase liquido/solido e viceversa della miscela di sali. Successivamente è stato svuotato il circuito e riempito con la miscela di sali bassofondente ternaria Na/K/Li//NO₃ per applicazioni ad alta temperatura (400-600 °C); per l’attività di riempimento e prima fusione è stata seguita la procedura operativa sviluppata nella precedente LA1.21. Sono state condotte le prove funzionali del circuito e sono stati inseriti i provini, sia saldati che non, degli acciai austenitici scelti in precedenza (AISI 347H, AISI 304) da sottoporre ai test di corrosione. Infine, nel 1° semestre 2024 è proseguita la LA1.26 avente per oggetto la “comunicazione e disseminazione dei risultati da Luglio 2023 a Dicembre 2024”. Nell’ambito della LA1.26, nel corso del 1° semestre 2024, l’attività di comunicazione e disseminazione è stata realizzata, tra l’altro, mediante: partecipazione a 2 conferenze internazionali e preparazione per la rilevante partecipazione del Progetto alla “SolarPACES Conference 2024” (evento mondiale di riferimento della comunità del solare termico a concentrazione che si sarebbe tenuto in Italia, in particolare a Roma, nei giorni 8-11 Ottobre 2024, tornando in Europa dopo oltre un decennio di edizioni ospitate negli altri quattro continenti); partecipazione a 2 workshop, di cui 1 organizzato da ENEA; organizzazione e partecipazione all’evento “Stati Generali del Solare Termico a Concentrazione”, tenuto a Roma il 29 Gennaio 2024, che è il primo dei 2 eventi disseminazione previsti dal capitolato di Progetto, a cui hanno aderito rappresentanti degli stakeholder nazionali (industria e ricerca) e dei Ministeri competenti, che hanno discusso in merito alla proposta italiana per il solare a concentrazione valutando le possibili sinergie e fattori che potrebbero supportare la diffusione della tecnologia nel Paese, e nell’ambito del quale è stata data ampia visibilità ai risultati intermedi di Progetto e alle opportunità per il settore del CSP connesse all’organizzazione in Italia della “SolarPACES Conference 2024”; partecipazione a un meeting di un comitato internazionale di riferimento del settore del CSP (“Comitato Esecutivo IEA TCP SolarPACES”). Inoltre, l’attività di disseminazione è stata realizzata, nel semestre in oggetto, mediante: pubblicazione di un articolo su rivista scientifica internazionale indicizzata; sottomissione di ulteriori 3 articoli per la pubblicazione su riviste scientifiche internazionali indicizzate e di un articolo per la pubblicazione su atti di conferenza internazionale; supporto all’aggiornamento della nuova sezione dedicata alla Ricerca di Sistema elettrico del sito web ENEA.
Politecnico di Milano [PoliMI] Dipartimento di Energia	Facendo riferimento alla struttura del Progetto 1.9 “Solare termodinamico”, sono di seguito descritte le attività svolte nel 1° semestre 2024 dal Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano (PoliMI).

	Tematica scientifico-applicativa “ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili”. - Nell’ambito della linea di ricerca sulla “simulazione e ottimizzazione di impianti ibridi CSP/PV/Eolici di scala medio-piccola operanti sui mercati MGP e MSD”, nel 1° semestre 2024 è proseguita la LA1.19 avente per oggetto la “simulazione e ottimizzazione di impianti ibridi CSP/PV/Eolici di scala medio-piccola operanti sul Mercato del Giorno Prima (MGP) e sul Mercato dei Servizi di Dispacciamento (MSD)”. Nella LA1.19, nel corso del 1° semestre 2024, si sono estesi i modelli pre-esistenti di impianti ibridi includendo anche la tecnologia Eolica, di cui sono state prodotte le curve di produzione oraria. Sono stati quindi definiti modelli termodinamici di cicli di potenza Rankine a vapor d’acqua ed a fluido organico (1-5 MW) e sono state stimate le prestazioni sia in regime stazionario che in condizioni di off-design per diverse architetture di ciclo, selezionando le più performanti. Le prestazioni degli impianti ibridizzati CSP, PV ed Eolico sono state quindi valutate imponendo livelli di dispacciabilità (DL) crescenti, dimostrandosi che gli impianti ibridi sono maggiormente competitivi rispetto alle singole tecnologie, soprattutto per alti DL. Le prestazioni degli impianti ibridizzati CSP, PV ed Eolico sono state quindi ottimizzate considerando la possibilità di tali impianti di operare come UVAM (Unità Virtuale Abilitata Mista) sul Mercato elettrico del Giorno Prima (MGP) e sul Mercato dei Servizi di Dispacciamento (MSD), con la funzione obiettivo della massimizzazione dei profitti. Nel caso di partecipazione al solo MGP non risulta conveniente installare alcuna tipologia di impianto, mentre applicando moltiplicatori di prezzo pari a 2 viene installato un impianto di tipo ibrido PV/Eolico e solo aumentando il moltiplicatore a 4 viene installato un impianto ibrido CSP/PV/Eolico. Nel caso in cui nell’ottimizzazione si imponga invece la soddisfazione completa della domanda dell’MSD, l’impianto CSP/PV/Eolico con riscaldatore elettrico e accumulo termico ed elettrico risulta la migliore opzione, sebbene conseguendo un NPV negativo (-110 M€), ma decisamente migliore rispetto ad un impianto ibrido ottimizzato PV-Eolico con solo accumulo elettrico (-333 M€).
Politecnico di Torino [PoliTO] Dipartimento Energia	Facendo riferimento alla struttura del Progetto 1.9 “Solare termodinamico”, sono di seguito descritte le attività svolte nel 1° semestre 2024 dal Dipartimento Energia del Politecnico di Torino (PoliTO). Tematica scientifico-applicativa “ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili”. - Nell’ambito della linea di ricerca sui “sistemi di accumulo termico, di tipo termoclino, ibridizzati alimentabili da CSP e da altre tecnologie energetiche rinnovabili, per la produzione di calore per processi industriali”, nel 1° semestre 2024 è proseguita la LA1.14 avente per oggetto lo “sviluppo di un modello numerico di un sistema di accumulo termoclino ibridizzato con due serpentine e resistenze elettriche immerse nei sali: confronto con il sistema termoclino ibridizzato con tre serpentine e caldaia elettrica”. Nella LA1.14, nel corso del 1° semestre 2024, sulla base del modello termo-fluidodinamico (CFD) sviluppato nella precedente LA1.12 mediante il software Star-CCM+, si è proceduto a simulare il sistema di accumulo termoclino ibridizzato tra CSP e altra tecnologia FER (LA1.11, LA1.12 e LA1.13) dotato di 3 serpentine, mezzo di accumulo costituito da una miscela di sali ternari (Hitec XL) e il cui fluido termovettore è un olio diatermico. Nelle simulazioni condotte sono state ipotizzate temperature nominali di esercizio di 190 °C (sali freddi) e 280 °C (sali caldi); sono stati simulati i transitori di carica e scarica di maggiore interesse, replicati nella campagna sperimentale della LA1.13. In particolare, si è simulata la presenza di una girante assiale nei canali verticali all’interno del serbatoio, il cui scopo è quello di rallentare il flusso dei sali assicurando la portata nominale. I risultati delle simulazioni indicano che il miscelamento dei sali nel serbatoio perturba la formazione del termoclino anche assicurando la portata nominale mediante la girante. - Nell’ambito della linea di ricerca sui “sistemi innovativi di riscaldamento elettrico dei sali fusi per l’ibridizzazione del CSP con altre tecnologie energetiche rinnovabili”, nel 1° semestre

	2024 è proseguita la LA1.18 avente per oggetto l'“analisi numerica del potenziale applicativo di una tecnologia innovativa di riscaldamento elettrico dei sali fusi”. Nella LA1.18, nel corso del 1° semestre 2024, è proseguita l'attività di simulazione numerica del dispositivo sperimentale per il riscaldamento a microonde dei sali fusi (progettato nella LA1.15 e realizzato nella LA1.17), mediante il modello numerico di dettaglio sviluppato nel precedente semestre, costituito da un modello elettromagnetico accoppiato ad un modello termo-fluidodinamico. Il modello considerava l'installazione di una girante assiale, per uniformare la temperatura dei sali fusi nel serbatoio, e di uno Sliding Short Circuit (SSC), per la regolazione del coefficiente di riflessione elettromagnetica della cavità risonante costituita dal serbatoio del dispositivo sperimentale. Dalle simulazioni condotte, lo SSC risultava avere un effetto trascurabile indipendentemente dall'estensione considerata. Il carico termico volumetrico calcolato con il modello elettromagnetico è stato imposto nel modello termo-fluidodinamico, che tiene conto delle perdite termiche e del campo di velocità determinato dalla girante. Simulando un transitorio di 7 minuti, si è verificato che la girante permette di ottenere una distribuzione uniforme della temperatura. Infine, sono state definiti, mediante simulazione, i test sperimentali di interesse per la LA1.17 inerenti alla verifica (i) delle perdite termiche del dispositivo sperimentale (impatto delle numerose flange della calotta superiore del serbatoio, che costituiscono ponti termici non previsti dal modello numerico) e (ii) delle prestazioni elettromagnetiche della cavità risonante al variare della temperatura dei sali.
Università degli Studi di Firenze [UniFI] Dipartimento di Ingegneria Industriale	Facendo riferimento alla struttura del Progetto 1.9 “Solare termodinamico”, sono di seguito descritte le attività svolte nel 1° semestre 2024 dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Firenze (UniFI). Tematica scientifico-applicativa “materiali e componenti avanzati per impianti CSP”. - Nell'ambito della linea di ricerca sulla “tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di energia in contesti civili e industriali”, nel 1° semestre 2024: (1) è proseguita ed è stata porta a termine la LA1.4 avente per oggetto l'“analisi del potenziale applicativo della tecnologia micro-CSP basata su sistemi di tipo micro-PTC per la generazione distribuita di calore, elettricità ed energia frigorifera in contesti civili e industriali”; (2) è iniziata la LA1.6 avente per oggetto lo “studio progettuale di up-grade del sistema micro-PTC innovativo di UniFI per il suo impiego per la cogenerazione di calore di processo a media temperatura e di energia elettrica con un ciclo ORC”. Nella LA1.4, nel corso del 1° semestre 2024, è stata completata la valutazione, mediante modellazione numerica dinamica in ambiente TRNSYS 18, delle prestazioni tecnico-economiche del prototipo di sistema micro-PTC (sviluppato da UniFI in attività di ricerca antecedenti a quelle di Progetto) in diversi contesti applicativi, tra cui la produzione di calore a media temperatura per processi industriali, la generazione di energia frigorifera in ambito civile e la produzione di energia elettrica tramite ciclo ORC. La producibilità annua del micro-PTC di UniFI è stata stimata per differenti siti, a diversa radiazione solare diretta (DNI), sul territorio nazionale (Milano, Firenze, Roma, Palermo). La sostenibilità economica è stata valutata con metodologia LCOH e LCOE. In merito all'applicazione del sistema micro-PTC di UniFI per la produzione di calore di processo a media temperatura in ambito industriale, sono stati considerati 2 casi studio. Nel primo caso studio, il micro-PTC è stato applicato a una lavanderia industriale con richiesta di vapore a 160 °C, che lavora su 3 turni e con un fabbisogno di calore pari a 785 MWh/anno. La configurazione ottimizzata prevedeva l'impiego di 1000 m² di micro-PTC, con olio sintetico come fluido termovettore (HTF) e un sistema di accumulo termico (TES) a sali fusi da 10 m³. I risultati mostrano che la Solar Fraction (SF) si mantiene intorno al 50% per tutti i siti simulati, con una differenza massima dell'11% tra Palermo e Firenze, dovuta alla diversa DNI; l'LCOH risulta ovunque superiore a 0.12 €/kWh, con un andamento coerente con quello della SF. Nel secondo caso studio, il micro-PTC è stato applicato a un'industria metalmeccanica con processi produttivi che raggiungono temperature fino a 700 °C, ipotizzandone l'impiego per la fase di pre-riscaldamento fino a 350 °C, e con un fabbisogno di calore pari a 234 MWh/anno. La configurazione ottimizzata prevedeva l'impiego di 300 m² di micro-PTC, con olio sintetico come HTF e TES a sali fusi di 10 m³. Per questo secondo caso studio, la SF è risultata superiore al 25% per tutti i siti, con una differenza massima del 10% tra Palermo e Firenze; l'LCOH si è attestato su valori compresi tra 0.23

€/kWh (Palermo) e 0.32 €/kWh (Firenze), con un andamento analogo alla SF. In merito all'applicazione del sistema micro-PTC di UniFI per la produzione di energia frigorifera in ambito civile, l'utenza residenziale considerata come terzo caso studio è costituita da un complesso di edilizia popolare sito in Firenze (via Torre degli Agli) di 2 edifici ad alta efficienza energetica (classe A4), per 90 appartamenti totali. L'impianto modellato prevedeva l'utilizzo di 140 m² lordi (circa 108 m² netti) di micro-PTC, impiego di acqua come HTF e 30 m³ di TES ad acqua; il calore prodotto dal micro-PTC alimentava un chiller ad assorbimento a doppio stadio di tipo commerciale. I risultati hanno evidenziato una SF per la produzione di acqua calda sanitaria (ACS) intorno al 45% per tutti i siti. La produzione di energia frigorifera è risultata pari a circa 60 MWh/anno nelle città di Milano, Roma e Palermo, mentre a Firenze si sono raggiunti circa 50 MWh/anno; la resa specifica del micro-PTC si è attestata tra 356 e 416 kWh/m²/anno, mentre l'LCOH variava da 0.119 €/kWh a Palermo fino a 0.148 €/kWh a Firenze. È stato inoltre effettuato un confronto tra due diverse tecnologie rinnovabili per la produzione di energia frigorifera: da un lato il micro-PTC di UniFI abbinato al chiller ad assorbimento, dall'altro un sistema PV abbinato a una pompa di calore a compressione (PDC). Le prestazioni delle due soluzioni sono risultate piuttosto vicine, con una produzione leggermente superiore (tra il 16% e il 33%) nel caso della tecnologia PV; lavorando il micro-PTC sulla DNI mentre il PV sulla radiazione solare globale, le differenze osservate nella quantità di energia frigorifera prodotta tra i vari siti e tra le due tecnologie sono attribuibili principalmente alla diversa incidenza della DNI rispetto a quella globale. Sebbene la tecnologia PV + PDC risulti oggi più vantaggiosa grazie alla sua maturità e semplicità impiantistica, va considerato che i sistemi PV richiedono sistemi di accumulo elettrico a batterie (BESS), solitamente più costosi rispetto agli accumuli termici del micro-PTC. In merito all'applicazione del sistema micro-PTC di UniFI per la produzione di energia elettrica, nel quarto caso studio è stata analizzata la possibilità di produrre elettricità in ambito industriale tramite una macchina a Ciclo Rankine Organico (ORC) "alimentata" dal micro-PTC. L'impianto considerato prevedeva l'impiego di 4000 m² di micro-PTC e 1000 m³ di TES, abbinati a una macchina ORC della Turboden con potenza elettrica nominale di 400 kW, efficienza del 24% e temperatura in ingresso di 300 °C. In queste condizioni, l'efficienza di conversione dal solare all'elettrico è risultata pari a circa il 6%, valore piuttosto contenuto a causa della bassa efficienza del micro-PTC a temperature elevate; l'LCOE si è mantenuto superiore a 1.2 €/kWh in tutti i siti, con un valore massimo di 1.87 €/kWh (Firenze) e minimo di 1.23 €/kWh (Palermo). Il confronto con un impianto PV di analoga potenza evidenzia un LCOE nettamente inferiore per il PV, risultando tale paragone diretto poco significativo in quanto il micro-PTC rimane un sistema ancora prototipale. In conclusione, il sistema micro-PTC proposto da UniFI si conferma una tecnologia già interessante per la produzione di calore a media temperatura in ambito industriale a qualunque latitudine sul territorio nazionale, rappresentando oggi l'unica vera alternativa rinnovabile ai combustibili fossili per questo tipo di applicazioni. La sua architettura compatta e modulare lo rende inoltre facilmente installabile sulle coperture degli edifici. Anche per quanto riguarda la produzione di energia frigorifera, i risultati ottenuti impiegandolo con il chiller ad assorbimento dimostrano prestazioni promettenti, sebbene la tecnologia PV + PDC sia attualmente più efficiente e consolidata. Per contro, l'impiego del micro-PTC per la produzione di energia elettrica tramite ORC presenta ancora diversi limiti prestazionali che ne riducono la competitività rispetto tecnologie rinnovabili più mature, quali il PV. Per rendere il micro-PTC di UniFI competitivo su larga scala, sarà fondamentale intervenire sull'ottimizzazione del collettore e puntare sull'industrializzazione del sistema, in modo da beneficiare di economie di scala e migliorare l'efficienza complessiva d'impianto.

Nella LA1.6, nel corso del 1° semestre 2024, UniFI ha supportato ENEA che, nella LA1.5, ha completato la predisposizione delle facility sperimentali per testare il prototipo di sistema micro-PTC di UniFI che, nel mese di giugno 2024, è stato consegnato e installato presso la "stazione testing componenti solari a media e bassa temperatura" dell'impianto sperimentale "ENEA-SHIP" del C.R. ENEA di Casaccia. Inoltre, nella LA1.6 sono iniziate le attività di modellazione numerica basata sul Metodo degli Elementi Finiti (FEM) finalizzata a valutare le principali criticità relative al prototipo di sistema micro-PTC di UniFI, con speciale riguardo al tubo ricevitore, e di studio di soluzioni tecniche alternative e migliorative per alcuni componenti del sistema micro-PTC UniFI finalizzate all'ottimizzazione del processo di costruzione degli stessi.

Università degli Studi di Napoli Federico II [UniNA] Dipartimento di Ingegneria Industriale	Facendo riferimento alla struttura del Progetto 1.9 “Solare termodinamico”, sono di seguito descritte le attività svolte nel 1° semestre 2024 dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell’Università degli Studi di Napoli Federico II (UniNA). Tematica scientifico-applicativa “soluzioni tecniche e procedure operative per il settore industriale del CSP”. - Nell’ambito della linea di ricerca sulle “tecnologie ad ultrasuoni per sistemi di rilevazione di occlusioni solide all’interno del piping di impianti CSP utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore”, nel 1° semestre 2024 è proseguita la LA1.20 avente per oggetto l’“utilizzo di tecnologie ad ultrasuoni per la rilevazione di occlusioni solide all’interno del piping di impianti CSP utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore”. Nel corso del 1° semestre 2024, è proseguito lo studio inerente alla LA1.20 elaborando e analizzando, mediante programmi sviluppati in MATLAB, i risultati delle oltre 7000 simulazioni condotte (nel precedente e nel presente semestre di Progetto) per esplorare il comportamento dell’attenuazione del campo ultrasonico che si propaga in una miscela di sali fusi, in assenza e in presenza di inclusioni di sali solidificati. L’attenuazione del segnale ultrasonico risultava dipendere dalla posizione e dalla dimensione delle inclusioni solide; due picchi di attenuazione si verificavano con l’inclusione formata vicino all’emettitore o al ricevitore di ultrasuoni, rispetto ai casi in cui l’inclusione è nelle zone intermedie tra emettitore e ricevitore. È stata costruita una superficie 3D, $\bar{\alpha}(x_p, \phi)$, che mostra un comportamento non lineare dell’attenuazione dell’intensità ultrasonica, quantificata mediante il coefficiente di attenuazione adimensionale $\bar{\alpha}$, in funzione della posizione dell’inclusione solida x_p e della porosità della sezione ϕ, quest’ultima in relazione con la dimensione dell’inclusione solida. È stata implementata una mappa di probabilità della presenza di inclusioni solide nel piping, $P(\phi \bar{\alpha})$, utile per supportare decisioni operative: se la probabilità P è maggiore di un valore di soglia P_{min}, il sistema è considerato sicuro; se P è minore di P_{min}, è necessario attivare un meccanismo di intervento per mettere in sicurezza il tratto di piping dell’impianto interessato dalla solidificazione della miscela di sali (es. riscaldamento tubazione per fondere le inclusioni solide). L’approccio individuato permette un monitoraggio dinamico e preventivo del fenomeno dell’indesiderata formazione di occlusioni solide all’interno del piping di impianti CSP utilizzando miscele di sali fusi come fluido termovettore.
Università degli Studi di Palermo [UniPA] Dipartimento di Ingegneria	Facendo riferimento alla struttura del Progetto 1.9 “Solare termodinamico”, sono di seguito descritte le attività svolte nel 1° semestre 2024 dal Dipartimento di Ingegneria dell’Università degli Studi di Palermo (UniPA). Tematica scientifico-applicativa “materiali e componenti avanzati per impianti CSP”. - Nell’ambito della linea di ricerca sui “coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti CSP a collettori lineari”, nel 1° semestre 2024 è proseguita la LA1.3 avente per oggetto lo “studio morfologico, strutturale e composizionale di materiali e strutture multistrato per coating innovativi per tubi ricevitori evacuati di impianti micro-PTC a media temperatura e di impianti CSP ad alta temperatura”. Nella LA1.3, nel corso del 1° semestre 2024, UniPA ha condotto analisi morfologiche e strutturali dei materiali e delle strutture multistrato, sviluppate da ENEA nella LA1.1, idonee ad essere utilizzate per la preparazione di coating solari ad alte prestazioni per tubi ricevitori evacuati di impianti micro-PTC operanti a media temperatura (fino a 350 °C), realizzati da ENEA nella LA1.2. Le analisi SEM in piano e in sezione ed EDS line in sezione, effettuate su coating as-grown e sottoposti a test di annealing in vuoto alla temperatura di 350 °C, hanno evidenziato: (i) variazioni dei grani, a seguito di trattamenti termici, tali da non inficiare la stabilità strutturale dei coating; (ii) struttura e distribuzione dei vari elementi invariata; (iii) diffusività dei vari elementi all’interno della struttura trascurabile. Pertanto, i nuovi coating solari realizzati presentavano proprietà strutturali idonee per essere utilizzati con elevata stabilità in applicazioni in vuoto alla temperatura operativa di 350 °C permettendo una più agevole e quindi più economica gestione dell’impianto micro-CSP di tipo micro-PTC.

Università degli Studi di Roma Tor Vergata [UniRM2] Centro Interdipartimentale Nanoscienze, Nanotecnologie e Strumentazione Avanzata	Facendo riferimento alla struttura del Progetto 1.9 “Solare termodinamico”, sono di seguito descritte le attività svolte nel 1° semestre 2024 dal Centro Interdipartimentale Nanoscienze, Nanotecnologie e Strumentazione Avanzata (NAST) dell’Università degli Studi di Roma Tor Vergata (UniRM2). Tematica scientifico-applicativa “soluzioni tecniche e procedure operative per il settore industriale del CSP”. - Nell’ambito della linea di ricerca sulle “procedure operative per impianti CSP con fluido termovettore costituito da miscele di sali fusi bassofondenti e studio della compatibilità dei materiali a contatto con le miscele in condizioni reali di funzionamento”, nel 1° semestre 2024 è proseguita la LA1.24 avente per oggetto la “verifica in condizioni reali di funzionamento delle miscele di sali fusi bassofondenti operanti a media temperatura e ad alta temperatura: analisi metallografiche dei materiali sottoposti a test di compatibilità”. Nel corso del 1° semestre del 2024, nell’ambito della LA 1.24, UniRM2 ha iniziato l’attività focalizzata sulle analisi metallografiche dei provini di acciaio al C P355NH (A516 Gr.70), saldati e non saldati, che ENEA ha sottoposto nella LA1.23 a test di corrosione dinamica ponendoli a contatto, nel circuito “MoSE” (Molten Salt Experiments) del C.R. ENEA di Casaccia, con la miscela quaternaria di sali fusi bassofondente Na/K/Ca/Li//NO₃ selezionata per operare a media temperatura (200-400 °C). In particolare, è stata condotta una prima fase di attività che ha previsto: catalogazione dei provini in funzione del tempo e delle temperature di immersione; stima dei pesi e delle aree dei singoli provini ai fini del calcolo di variazione di spessore pre e post test; analisi SEM sulle superfici dei provini per valutare le tipologie di ossidi presenti (morfologia, spessore e composizione degli strati fino alla matrice della lega metallica); analisi EDS per ottenere le mappature delle superfici metalliche e per studiarne l’omogeneità; analisi XRD, per analizzare la composizione delle fasi solide negli strati ossidati e fornire informazioni complementari.
--	--